

## بهینه سازی پایداری سیستم های توان در حضور واحدهای تولیدی تجدید

پذیر

### پارسا تهمورسی ۱ و مجتبی تهمورسی ۲ \*

افارغ التحصیل کارشناسی مهندسی تکنولوژی الکترونیک دانشکده فنی کردکوی

۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان

\*نویسنده مسئول Mojtabatahmoreesi@yahoo.com

### چکیده

در این تحقیق مقدمه ای از پیشینه یکپارچگی و کنترل منابع انرژی تجدیدپذیر و ارتباط آن با ذخیره انرژی الکتریکی و سپس انگیزه ها و اهداف تحقیق ارائه شده است. تولید برق جهانی تغییر عمده ای را نسبت به مشخصات سنتی تجربه کرده است که در آن سوخت های فسیلی بیشترین مصرف را دارند و منابع مختلف انرژی نقش مهمی را ایفا می کنند و انرژی های تجدیدپذیر نقش بسیار مهمی را ایفا می کنند. بر اساس پیش بینی بلندمدت اقتصادی در بخش انرژی جهان، تا سال ۲۰۴۰، منابع انرژی تجدیدپذیر ۵۰ درصد از تولید برق جهان را به خود اختصاص خواهند داد که در این میان انرژی خورشیدی و بادی ۳۴ درصد خواهد بود. به همین دلیل، علاقه روزافزون دانشگاه ها و صنعت به بررسی مشکلات توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف شده است. با وجود چندین دهه تلاش، این موضوع هنوز به طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است. در این تحقیق، در صورتی که تبدیل توان اولیه به الکتریسیته متغیر و غیرقابل کنترل باشد، یک منبع انرژی متغیر نامیده می شود. این نیروی متغیر دو جنبه دارد: نوسان و تناوب. به طور خلاصه، نوسانات در واقع تغییرات کوتاه مدت در نیرو است، در حالی که تناوب تغییرات بلندمدت در دسترس بودن آن است.

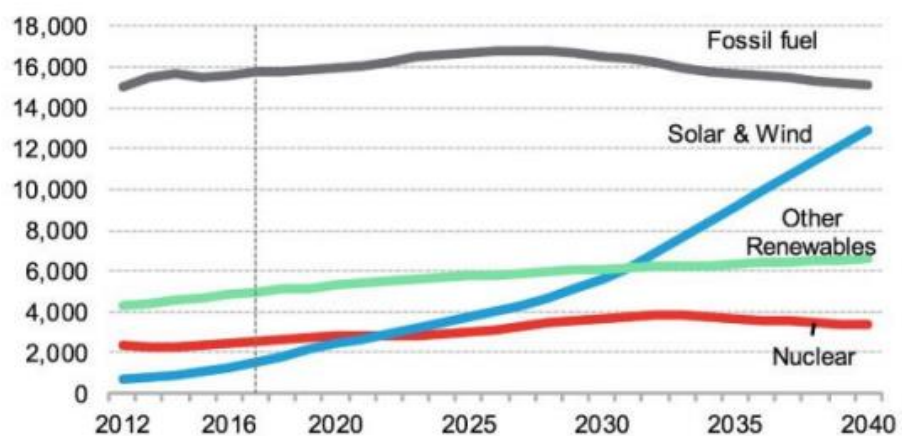
واژگان کلیدی: بهینه سازی، پایداری سیستم های توان، واحدهای تولیدی تجدید پذیر

## مقدمه

تولید نیروی جهانی یک تحول بزرگ از یک پروفایل سنتی را تجربه کرده است که در آن سوخت فسیلی بیشترین مصرف را دارد و انواع منابع انرژی نقش قابل توجهی دارند و انرژی تجدید پذیر نقش بسیار مهمی ایفا می کند. با توجه به پیش بینی اقتصادی بلندمدت در بخش انرژی جهان، تا سال ۲۰۴۰، منابع انرژی تجدید پذیر ۵۰ درصد از تولید برق جهان را به خود اختصاص خواهند داد که در آن انرژی خورشیدی و باد ۳۴ درصد خواهد بود. به همین دلیل، افزایش تمایل هم دانشگاهیان و هم صنعت، بر مطالعه مشکلات موجود در توسعه منابع انرژی تجدید پذیر متمرکز است. علی رغم چندین دهه تلاش، این موضوع هنوز به طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است. (فلورنتزو و همکاران، ۲۰۰۹)

سوخت های فسیلی عمده به دو دلیل پایدار نیستند. اول، ذخایری محدود هستند و برای بازیابی و استفاده مجدد غیراقتصادی خواهند شد. دوم، انتشار CO<sub>2</sub> ناشی از سوزاندن سوخت های فسیلی عامل مهمی برای گرم شدن جهانی هوای کره زمین و تغییر آب و هوا است. این مشکل به عنوان چالشی بزرگ برای انسان ها توسط بسیاری از کشورهای جهان شناخته شده است. تلاش های بین المللی انجام شده و انواع اسناد قانونی برای تعیین اهداف کاهش انتشار CO<sub>2</sub> امضا شده است. (پنا و همکاران، ۱۹۹۶)

Electricity Generation (TWh)



## شکل ترکیب تولید برق جهانی تا ۲۰۴۰

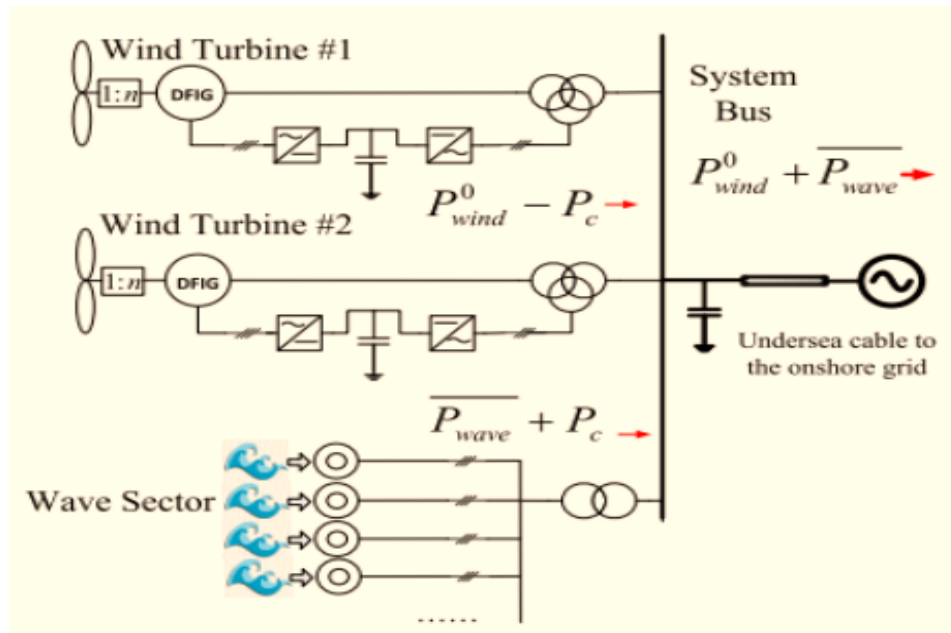
منابع انرژی سوخت فسیلی عمده شامل انرژی هسته ای و تجدید پذیر هستند. اولی را می تواند به دو گروه تقسیم کرد: انرژی شکافت و همجوشی هسته ای. انرژی شکافت قبلاً به طور تجاری برای تولید برق مورد استفاده قرار گرفته و هم چنین یک عامل امیدبخش در تولید انرژی آینده است. باین حال، تولید نیروی هسته ای سه عیب دارد: ۱- مثل سوخت های فسیلی، منابع سوخت هسته ای بر روی زمین محدود هستند؛ ۲- دفع زباله هسته ای مسئله ساز است و ۳- عموم مردم نگران امنیت هستند و باعث ایجاد موانع سیاسی برای توسعه آن می شوند. انرژی همجوشی هسته ای به طور گسترده به عنوان «راه حل نهایی» تأمین انرژی در نظر گرفته می شود، باین حال، پیشرفت های اخیر در تولید انرژی همجوشی هسته ای هنوز بسیار دور از برنامه های تجاری است. در نتیجه، تولید برق بر پایه منابع متعدد، از جمله تولید سوخت های فسیلی معمولی و پیشرفته، انرژی شکافت هسته ای و انواع منابع انرژی تجدید پذیر است. (فلورنتزو و همکاران، ۲۰۰۹)

## نوسان منابع انرژی تجدید پذیر

در این مطالعه، یک منبع انرژی در صورتی تبدیل نیروی اولیه تبدیل شده به برق متغیر و غیرقابل کنترل باشد، انرژی متغیر خوانده می شود. این نیروی متغیر دارای دو جنبه است: نوسان و تناوب. به طور خلاصه، نوسان در واقع تغییرات نیروی کوتاه مدت است، در حالی که تناوب تغییرات بلندمدت و در دسترس بودن آن است.

انرژی تجدید پذیر شامل شش نوع زیر است: انرژی خورشیدی، باد، نیروی دریا (انرژی موج و جزر و مد)، برق آبی، زمین گرمایی و زیست توده / سوخت زیستی. در این مطالعه، تمرکز بر نوسان انرژی تجدید پذیر از جمله انرژی خورشیدی، باد و موج است. نیروی جزر و مد متناوب است اما در حال نوسان نیست و بقیه منابع بدون دگرسانی و پایدار و قابل کنترل هستند.

نفوذ فزاینده نوسان انرژی های تجدید پذیر و تزریق متعاقب انتقال نیرو به شبکه مشکلاتی را ایجاد می کند که باید به درستی کنترل شود. این امر باعث تغییرات فرکانس، تکانه های ولتاژ، گردش های حرارتی و کنترل بیش از حد وسایل الکتریکی می شود. این مشکلات در یک شبکه ضعیف با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در حال بدتر شدن هستند. برای حذف این موانع فنی در راستای توسعه انرژی های تجدید پذیر، فن آوری های ذخیره انرژی الکتریکی (EES) بیشتر و بیشتر مورد مطالعه و مورداستفاده قرار می گیرند. این مطالعات هنوز برای شرایط پیچیده منابع انرژی متغیر ناکافی هستند و اجرای کنونی در مقیاس های کوچک و مراحل اولیه بوده است.



شکل ۲ یک سیستم نیروگاه بادی با تعداد زیادی واحدهای تولید انرژی تجدید پذیر

با هدف افزایش ظرفیت برق، کارایی کلی سیستم و کاهش هزینه سرمایه، ایجاد یک تولید نیرو تجدید پذیر در یک سیستم بزرگ با چندین واحد تولید نیروی منفرد، محبوب شده است. این را یک مزرعه، میدان یا نیروگاه برق در زمینه های مختلف (مانند نیروگاه بادی، میدان بادی، مزرعه موج و مزرعه خورشیدی) می نامند. (انج و چانگ، ۲۰۰۵) یک نمونه از چنین سیستمی در شکل ۱-۲ در چنین نیروگاه تجدید پذیری ارائه شده است، کنترل ها در سه لایه مختلف انجام می شوند، که عبارتند از: مبدل، واحد، و لایه سیستم، به شکل زیر. در لایه مبدل، هدف کنترل اولیه، ایجاد نیروی واکنش گر (P & Q) مبدل یا تنظیم فرکانس ولتاژ AC در نقطه اتصال مشترک با توجه به منابع کنترلی داده شده توسط کنترل لایه واحد است. دومی بیشتر در مبدل های جانبی شبکه معمول است. در لایه واحد، هدف کنترل، راه اندازی هر یک از واحدهای تولید نیروی

واحد است، به عنوان مثال، حداکثر رساندن نیروی اولیه به دست آمده با کنترل گشتاور، سرعت، قدرت واقعی یا واکنشی در بخش اولیه. منابع تعیین شده در این لایه در کنترل مبدل مورد استفاده قرار می گیرند، همان طور که در بالا توضیح داده شد. کیفیت نیروی خروجی، بر مبنای یک واحد نیز باید در این لایه کنترل شود. (هوآ و همکاران، ۱۹۹۵) در لایه سیستم، هماهنگی واحدهای تولید برق چندگانه، کیفیت نیرو و ویژگی های خارجی کل نیروگاه در نظر گرفته می شوند. علاوه بر واحدهای تولید برق، یک نیروگاه برق تجدید پذیر می تواند شامل دستگاه های کمکی مانند EES، انتقال خطا از طریق دستگاه های (FRT) و متعادل کننده های نیرو و واکنشی برای بهبود عملکرد کلی سیستم باشد، و عملکرد این دستگاه های کمکی نیز بخشی از کنترل لایه سیستم است.

### سیستم های EES برای یکپارچه سازی شبکه منابع انرژی تجدید پذیر دارای نوسان

همان طور که ذکر شد، ذخیره انرژی الکتریکی یک راه حل امیدبخش برای یکپارچه سازی انرژی های تجدید پذیر است. از آن می توان برای پشتیبانی از فرکانس ولتاژ، هموارسازی قدرت، و پشتیبانی FRT استفاده کرد. فن آوری های EES پیشرفته با توجه به شکل های انرژی ذخیره شده عبارت اند از: پتانسیل مکانیکی، شیمیایی، گرمایی، مکانیکی، الکتروشیمیایی و ذخیره میدان الکترو-مغناطیسی. در این تحقیق، آن ها به دودسته ذخیره سبک و ذخیره سنگین طبقه بندی می شوند. (انج و چانگ، ۲۰۰۵)

ذخیره سبک شامل سیستم های ذخیره انرژی چرخ لنگر (FESS)، ذخیره میدان الکترو-مغناطیسی مانند ابر خازن و ذخیره انرژی مغناطیسی ابرسانا (SMES) و گروهی از باتری های مقیاس کوچک با بازده بالا است. به طور کلی، ذخیره سبک نسبتاً کوچک است اما با بازده چرخه بالا، که به صورت نسبت کل خروجی برق به ورودی و پاسخ سریع تعریف می شود. زمان تخلیه در نیرو اسمی از ثانیه تا بیش از نیم ساعت است. بازده چرخه ذخیره سبک می تواند بیش از ۹۰٪ باشد، و زمان پاسخ از میلی ثانیه به بیش از یک دوره همگام سازی شبکه است. با این حال، اغلب ذخیره سبک، به جز باتری، مشکل بزرگ تخلیه خود را دارند که پتانسیل آن ها را در کاربردهای بلندمدت محدود می کند. با توجه به این ویژگی ها، ذخیره سازی سبک برای کاربردهای کوتاه مدت مناسب تر است که نیازمند ظرفیت کوچک تر اما پاسخ سریع و کارایی زیاد مانند پشتیبانی کیفیت نیرو، انتقال از طریق ظرفیت و تأمین نیروی ترکیبی است.

ذخیره سازی سنگین شامل ذخیره بالقوه مکانیکی (مثلاً ذخیره آبی پمپاژی PHS، زبردیا یا ذخیره انرژی هوا CAES)، ذخیره سازی شیمیایی (ذخیره سازی هیدروژن برای سلول های سوختی)، ذخیره سازی انرژی گرمایی (TES)، و یک بسته از باتری های مصرفی شامل باتری های جریان است. ذخیره سنگین را می توان برای کاربردهای بلندمدت تنظیم کرد و دبی تخلیه آن بسیار کم و حتی به صفر رساند. ظرفیت نیرو آن از چند مگاوات تا بیش از ۱۰۰ مگاوات است و زمان تخلیه معمول در نیروی مجاز از چند ساعت تا یک روز است. مشکلات ذخیره سازی سنگین، بازده پایین واکنش آهسته آن است. بازده معمولی از حدود 50% (برای CAES، TES یا سلول های سوختی هیدروژن) به بیش از 85% (PHS) می رسد و زمان واکنش بین چند ثانیه و چند دقیقه است. علاوه بر این، برای برخی انواع ذخیره سنگین تعامل با سیستم الکتریکی با جریان نیروی دوسویه مناسب است. به عنوان مثال، در CAES، پیل های سوختی و بیشتر TES، فرآیندهای شارژ و تخلیه با استفاده از دستگاه های تبدیل انرژی متفاوت و مجزا حاصل می شوند. به همین دلیل، ذخیره سازی سنگین برای کاربردهای بلندمدت و بزرگ مانند تغییر زمان، جابجایی بار، راه اندازی بدون نور برای واحدهای هسته ای و ذخیره دائمی مناسب تر است. (کومباسر و هاگراس، ۲۰۱۵)

بدیهی است که بین ذخیره سبک و سنگین تمایز مشخصی وجود ندارد و این دو در محدوده میانه خود همپوشانی دارند. برای مثال، باتری لیتیوم - یون می تواند به عنوان یک وسیله ذخیره سازی سبک یا سنگین مورد توجه قرار گیرد که به قدرت و ظرفیت انرژی بستگی دارد که در واقع از مزایای هر دو خانواده برخوردار است. با این حال، این طبقه بندی در این مباحث بسیار مفید است.

## اهداف تحقیق

این مطالعه، نیروگاه انرژی تجدید پذیر متغیرمجهز به EES و کاهش مشکلات ناشی از نوسانات نیروی منابع انرژی تجدید پذیر را مورد بررسی قرار می دهد و هدف آن تسهیل تولید برق در مقیاس بزرگ در آینده است. این کار، مطالعه و ارائه راه حل برای کنترل و ادغام شبکه نیروی تجدید پذیر در سه لایه است که در زیر آورده شده است. (گاینگ، ۲۰۰۴)

در لایه مبدل، این تحقیق به بررسی چگونگی تعیین پارامترهای کنترل PI در کنترل جاداشدگی dq مربوط به VSC که به طور گسترده با بینش های ریاضیاتی کافی مبتنی بر مدل فضای حالت استفاده شده می پردازد. در لایه واحد، روش های تلفیق و کنترل EES باهدف کاهش نوسانات نیرو کوتاه مدت قابل بررسی است. یک خانواده از سیستم کنترل EES به نام فیلتر انرژی پیشنهاد می شود که عملاً به صورت فیلترهای کم گذر جریان های نیرو عمل می کند. (نایاک و همکاران، ۲۰۱۲)

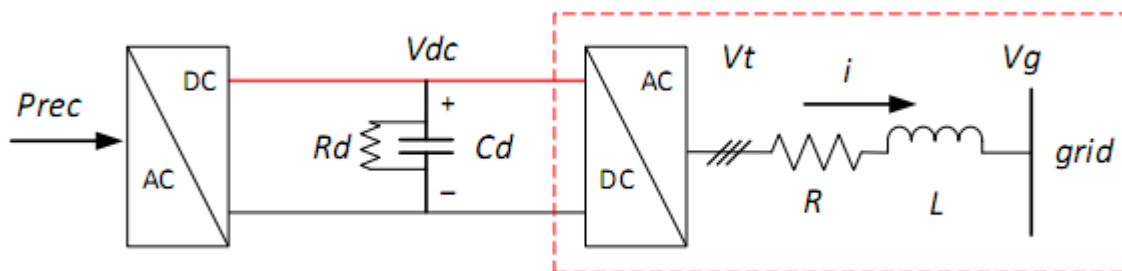
در لایه سیستم، به جای ترکیب ساده واحدهای تولید نیرو، فرض می شود که یک نیروگاه انرژی تجدید پذیر، یک سیستم کامل با خصوصیات خارجی خود برای شبکه باشد. در حال حاضر میدان های بادی و خورشیدی به صورت تجاری توسعه یافته اند اما کارهای بسیار محدودی در زمینه توسعه یک میدان با ترکیب EES انجام شده است. همچنین برای بررسی ارزش کنترل فیلتر انرژی بر روی میدان ها موج پیشنهاد شده است. کیفیت انرژی منابع انرژی متغیر

## مدل سازی و کنترل سیستم های تحریک الکتریکی مبتنی بر VSC

سیستم های تحریک الکتریکی، بر اساس مبدل های منبع ولتاژ (VSC) مبانی نیروگاه های تجدید پذیر از جمله تولید نیروی موج، بادی و خورشیدی هستند. سیستم کنترل عبارت از سه ماژول است: مبدل، دستگاه کنترل شده و کنترل کننده. مدل های سیستم های کنترل VSC در چارچوب مرجع کلاسیک Dq توضیح داده می شوند. در این مطالعه این مدل ها به صورت مختصر به لحاظ دستگاه های کنترل شده مختلف خود بررسی می شوند: شبکه، ماشین های همگام سازی مغناطیسی (PMSM)، ماشین های القا (IM) و ژنراتورهای القای تغذیه دو لبه (DFIG). کلید زین در حوزه ی 0.2-0.5ms در این سه مدل نظر گرفته نشده و فرض شده است که ولتاژ واقعی خروجی مبدل به صورت کامل از مراجع مشخص شده توسط کنترل گر تبعیت کند.

## VSC متصل به شبکه

در واحد تولیدی نیروی مبتنی بر VSC، مبدل به محل اتصال مشترک از طریق یک ترانسفورماتور اتصال پیدا می کند. با ساده کردن ترانسفورماتور به عنوان یک امپدانس مدار کوتاه معادل، مدل دستگاه توسط شکل ۳-۴-۵ توصیف شده است.



شکل ۳ مدل دستگاه مبدل VSC متصل به شبکه

$$v_{id} = Ri_d + L \frac{d}{dt} i_d - \omega L i_q + v_{gd} \quad ۱$$

$$v_{id} = R i_d + L \frac{d}{dt} i_d + w L i_q \quad ۲$$

$$(P_{grid}, Q_{grid})^T = \frac{3}{2} v_{gd} (i_d, i)^T \quad ۳$$

محور  $d$  قاب مرجع هم‌راستا با  $v_g$  است بنابراین هیچ‌گونه  $v_{gq}$  در تساوی محور  $q$  وجود ندارد. در مدل این دستگاه،  $(i_d, i_q)^T$  متغیرهای حالت،  $(v_{id}, v_{iq})^T$  ورودی‌های دستی و  $v_{gd}$  آشفتگی هستند. از این منظر، این مدل دستگاه یک سیستم غیرخطی مرتبه دوم است چراکه ضریب متغیر زمانی  $w$  است. برای سادگی در اکثر اقدامات مهندسی، عبارت اتصال متقاطع  $wLi$  به‌عنوان آشفتگی مانند  $v_{gd}$  در نظر گرفته می‌شود که هر دو آن‌ها می‌توانند در نقش کنترل‌گر عمل کنند چراکه به‌راحتی قابل‌اندازه‌گیری هستند. این عملیات را جداسازی محور  $q$  می‌نامند. پس از جداسازی، مدل دستگاه به دو سیستم مرتبه اول مستقل محور  $d$  و  $q$  تبدیل می‌شود که توسط کنترل‌گر PI بازخورد خروجی کنترل می‌شود.

### VSC متصل به PM SM

برای کنترل PMSM نیازمند دانستن مدل آن هستیم. برای عبارتهای خلاصه، شاخص‌های مکانی  $X = x_d + jx_d$  برای ترکیب کردن معادله محور  $d$  و  $q$  به‌عنوان بخش خیالی معادله پیچیده واحد استفاده می‌شوند. در چارچوب مرجع همگام‌سازی، مدل PMSM می‌شود.

$$V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} \psi_s + jw_r \psi_s \quad ۶$$

$$\psi_s = \psi_f + L_s I_s \quad ۷$$

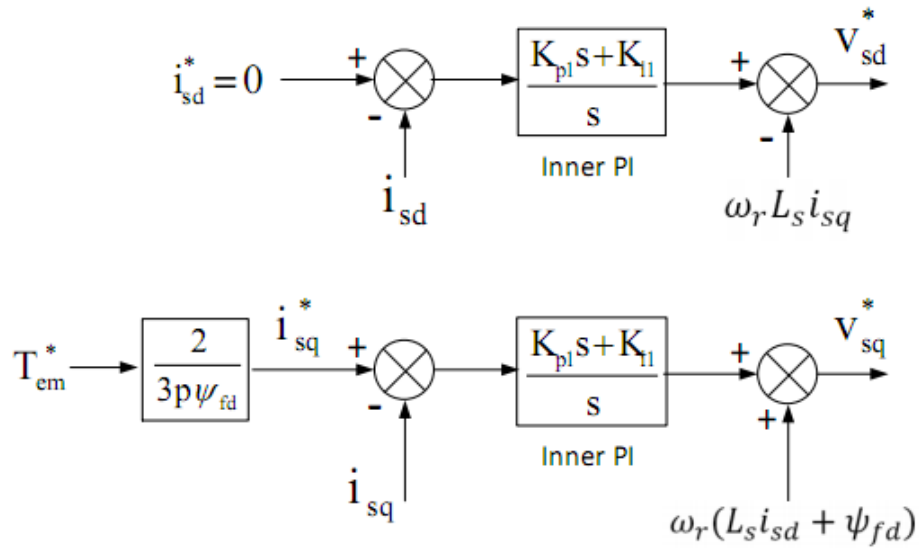
$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_{fd} \cdot i_{sq}) \quad ۸$$

محور  $d$  با شار مغناطیسی پایا  $\psi_{fd}$  هم‌راستا است. از آنجاکه  $\psi_{fd} = \psi_f$  ثابت است، با جایگزین کردن  $\psi_s$  در معادله ولتاژ، داریم.

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{ds} i_{sq} - w_r L_s i_{sd} \quad ۹$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{ds} i_{sq} + w_r L_s i_{sd} + w_r \psi_{fd} \quad ۱۰$$

این دو معادله با (4.1) و (4.2) با عبارات مشابهی مانند ورودی‌های دستی  $(v_{sd}, v_{sq})^T$ ، متغیرهای حالت  $(i_{sd}, i_{sq})^T$ ، عبارتهای جداسازی متقاطع و آشفتگی  $w_r \psi_{fd}$  قابل‌مقایسه هستند. بنابر این ساختار آن‌ها بسیار مشابه کنترل حلقه داخلی با VSC متصل به شبکه است؛ مانند حلقه خارجی، هدف کنترل اولیه، پیچشی الکترومغناطیسی  $T_{em}$  متناسب با  $i_{sq}$  است، بنابراین محور  $x$  دارای پیچش مستقیم یا کنترل نیرو است. محور  $d$  کنترل‌کننده  $i_{sd}$  مسئول ولتاژ استاتور یا کنترل نیروی واکنشی استاتور است. عملیات متداول تنظیم مرجع صفر  $i_{sd}$  در جهت حداقل کردن جریان‌های عبور کننده از مبدل است. در این موارد هم مجدداً نیازی به کنترل‌گرهای PI در حلقه خارجی نیست. بر اساس مباحث بالا، کنترل‌گر VSC متصل به PMSM در شکل ۴ ارائه شده است.



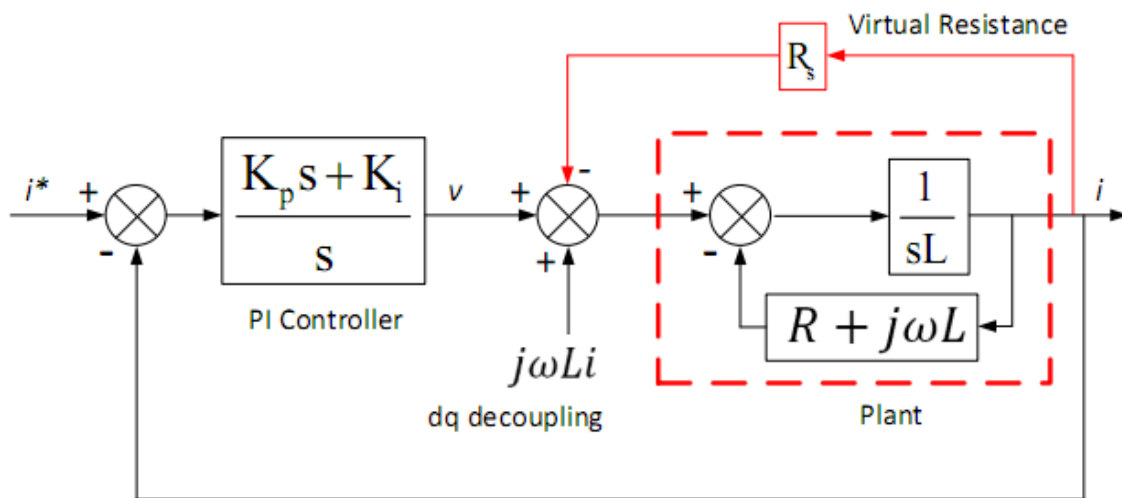
شکل ۴ نمودار کنترل گر VSC متصل به PMSM

#### روش جدید برای محاسبه پارامترهای PI

در این مطالعه، دو روش جدید برای محاسبه پارامترهای PI ارائه شده و ریسک مقاومت رابط ناکافی از بین می‌رود.

#### روش مقاومت مجازی

روش مقاومت مجازی از بازخورد اضافی سیگنال جریان به مرجع ولتاژ برای تخصیص مجدد قطب لغو شده در صفحه S استفاده می‌کند. افزایش علاقه بازخورد اضافی را مقاومت مجازی می‌نامند که باعث افت ولتاژ شده اما نیروی واقعی را مصرف نمی‌کند. در واقع، همان‌طور که از بخش ۴ قابل مشاهده است، مقدار واحد معمول مقاومت مجازی برابر 0.0024 است، که بسیار کوچک است و نمی‌تواند افت ولتاژ جدی ایجاد کند. نمودار کنترل این روش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ نمودار کنترل روش مقاومت مجازی

پارامتر دستگاه  $R$  به صورت معادل با این روش به  $(R + R_s)$  تغییر می‌یابد. پارامترهای PI به صورت زیر محاسبه می‌شوند

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = \frac{L}{T} \\ K_i = \frac{R + R_s}{T} \end{array} \right\} \quad 11$$

تابع انتقال سیستم کنترل مشابه (3.27) با این پارامترها است. اکنون قطب لغو شده می شود

$$s_2 = -\frac{K_i}{K_p} = -\frac{R + R_s}{L} \quad 12$$

توجه شود که مقاومت مجازی  $R_s$  می تواند به حد کافی بزرگ باشد به طوری که  $T > L/(R + R_s)$  و مورد ۱ در ۲-۲ جایگزین شود.

### کنترل فیلتر مرتبه دوم

کنترل فیلتر مرتبه دوم قطب دستگاه را لغو نمی کند و هیچ گونه ابعاد پنهانی وجود ندارد. این کار باعث می شود کل سیستم کنترل فیلتر مرتبه دوم شود و پارامترهای PI مطابق با ضریب میرایی مورد نظر  $\xi$  و بسامد طبیعی  $\omega_n$  محاسبه می شود. از شکل ۶، تابع انتقال حلقه بسته می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{(K_p + R)}{L}s + \frac{K_i}{L}} \quad 13$$

یک عبارت مشتق و یک عبارت متناظر در صورت معادله (4.46) وجود دارد. برای پاسخ مرحله سیستم، عبارت مشتق هیچ گونه تأثیری بر حالت پایدار ندارد و تنها حد بالای مضاعف به پاسخ ناپایدار وارد می کند. همچنین هیچ گونه تأثیری بر پایداری سیستم ندارد چراکه به موقعیت قطبها وابسته نیست. از این رو، عبارت مشتق می تواند با صرف نظر کردن از حد بالای مضاعف پاسخ مرحله ای نادیده گرفته شود. همچنین قابل توجه است که در اقدامات مهندسی در حالت کلی، عبارت مشتق باعث تقویت نویز می شود. در این مورد، مرتبه مخرج بیشتر از مرتبه صورت است و عبارت مشتق تنها به لحاظ ریاضی در صورتی (4.46) وجود دارد. هیچ گونه بلوک مشتقی به صورت واقعی در کل سیستم وجود ندارد، همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بنابراین نویز نمی تواند توسط کل سیستم تقویت شود. زمانی که عبارت مشتق  $\frac{K_p}{L}$  نادیده گرفته شود، (4.46) به شکل فیلتر مرتبه دوم استاندارد می شود.

$$H(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad 14$$

ضریب میرایی مطلوب  $\xi$  و بسامد طبیعی  $w_n$  می شوند

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \xi w_n = \frac{1}{T} \end{array} \right\} \quad 15$$

این ضریب میرایی کمترین مقداری است که باعث ایجاد رزونانس نمی شود. از معادلات (4.46)-(4.48)، پارامترهای PI به صورت زیر محاسبه می شوند



$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = \frac{2\sqrt{2}L}{T} - R \\ K_i = \frac{4L}{T^2} \end{array} \right.$$

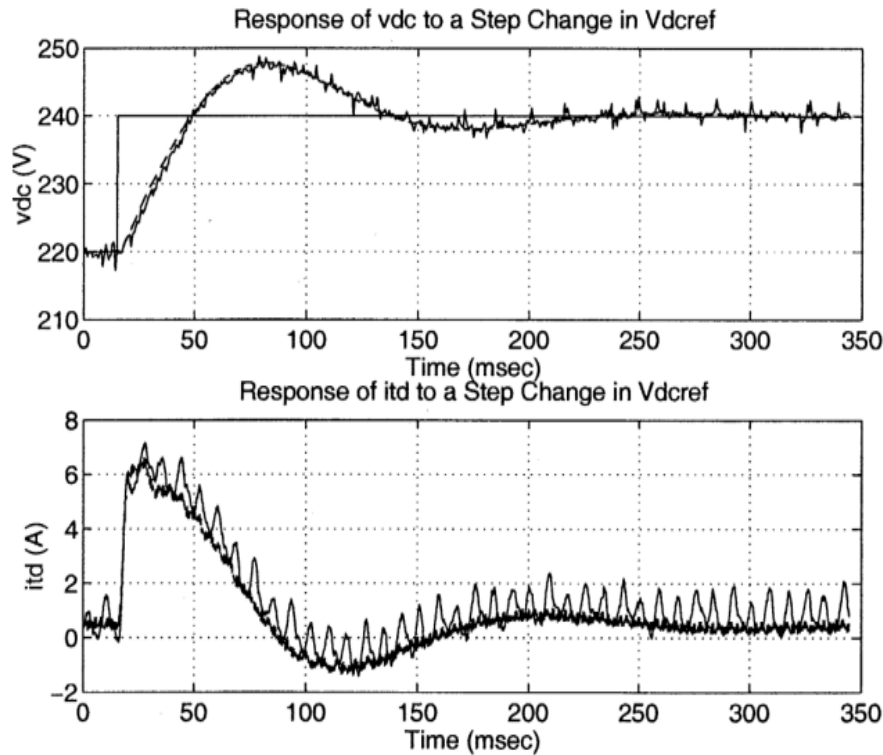
۱۶

### شبیه‌سازی

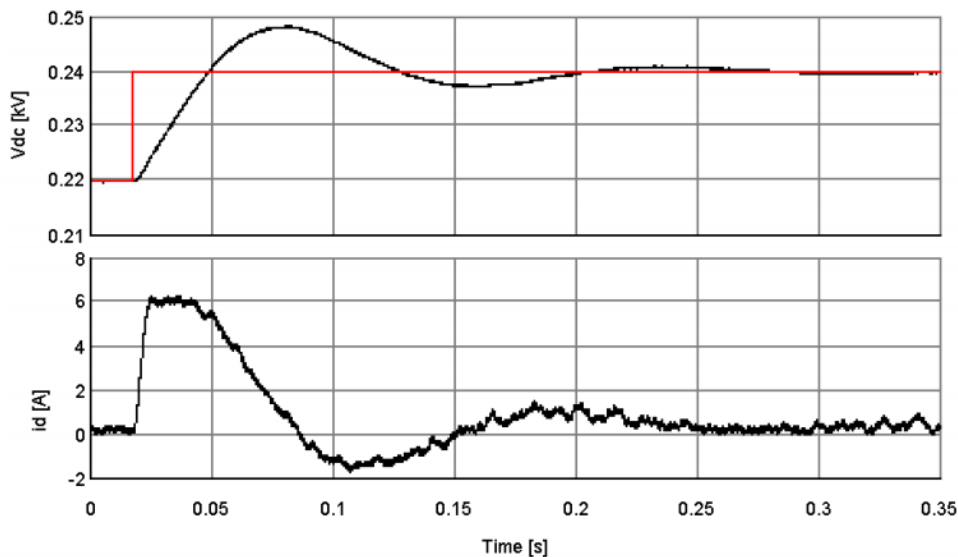
سه روش را برای محاسبه پارامترهای PI در کنترل جادشدگی dq VSC بررسی کردیم که در معادلات 15، 16 و 17 ارائه شده‌اند. روش لغو قطب صفر متداول، بدون مقاومت رابط کافی به علت ابعاد پنهان دیگر کاربردی نیست.

### مدل شبیه‌سازی و صحت‌سنجی آن

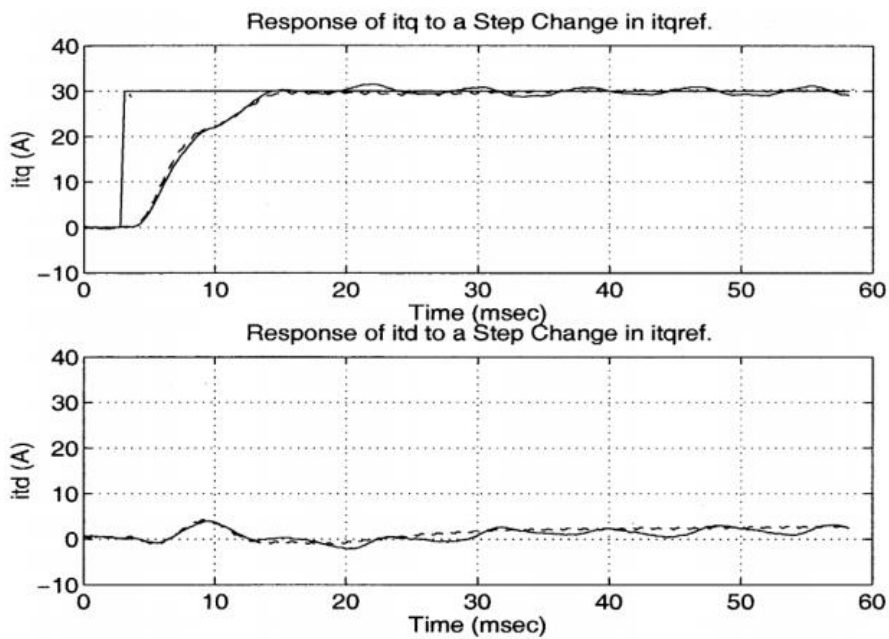
یک بستر آزمون برای روش‌های مشخص کردن پارامترهای PI بر اساس مدل شبکه واقعی شامل مدل معیار IEEE ژنراتورهای همگام‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل دستگاه از باید مصرف نیروی واکنشی متغیر زمانی به صورت موازی و STATCOM تشکیل می‌شود که توسط یک موتور القا با بار مکانیکی متغیر زمانی در موج مربعی در این مطالعه نشان داده شده است. STATCOM برای حفظ فاکتور نیروی واحد در محل اتصال مشترک کنترل می‌شود. در این مورد، نیروی واکنشی Q مستقیماً توسط جریان محور q کنترل می‌شود و از این رو عملکردهای کنترلی مستقیماً متأثر از پارامترهای PI حلقه داخلی هستند.



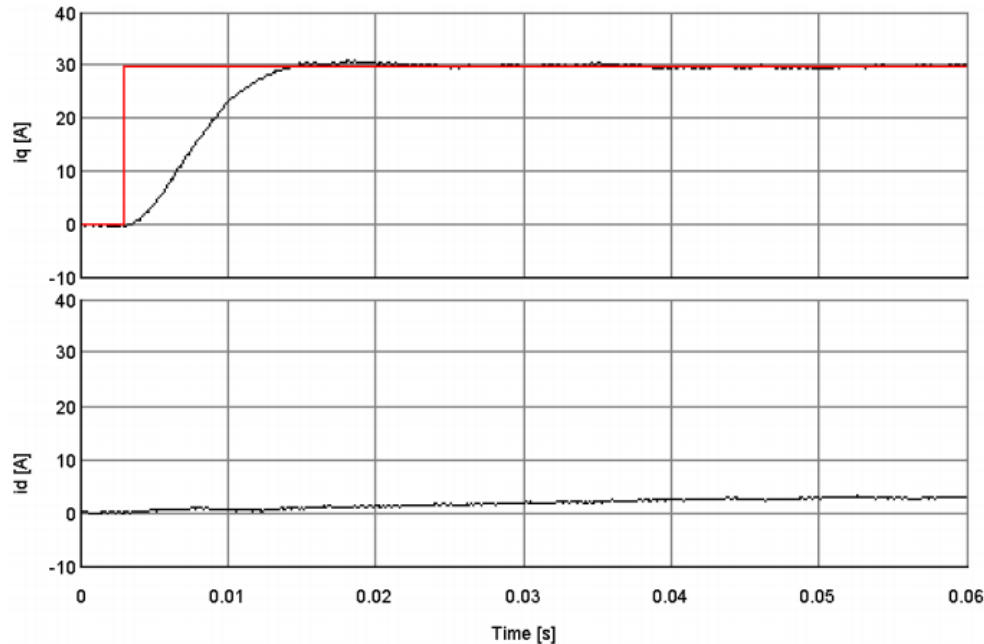
شکل ۶ پاسخ‌های مرحله‌ای ولتاژ DC سیستم معیار



شکل ۷ پاسخ های مرحله ای ولتاژ DC مدل توسعه یافته



شکل ۸ پاسخ های مرحله ای جریان محور Q سیستم معیار



شکل ۹ پاسخ‌های مرحله‌ای جریان محور Q مدل توسعه یافته

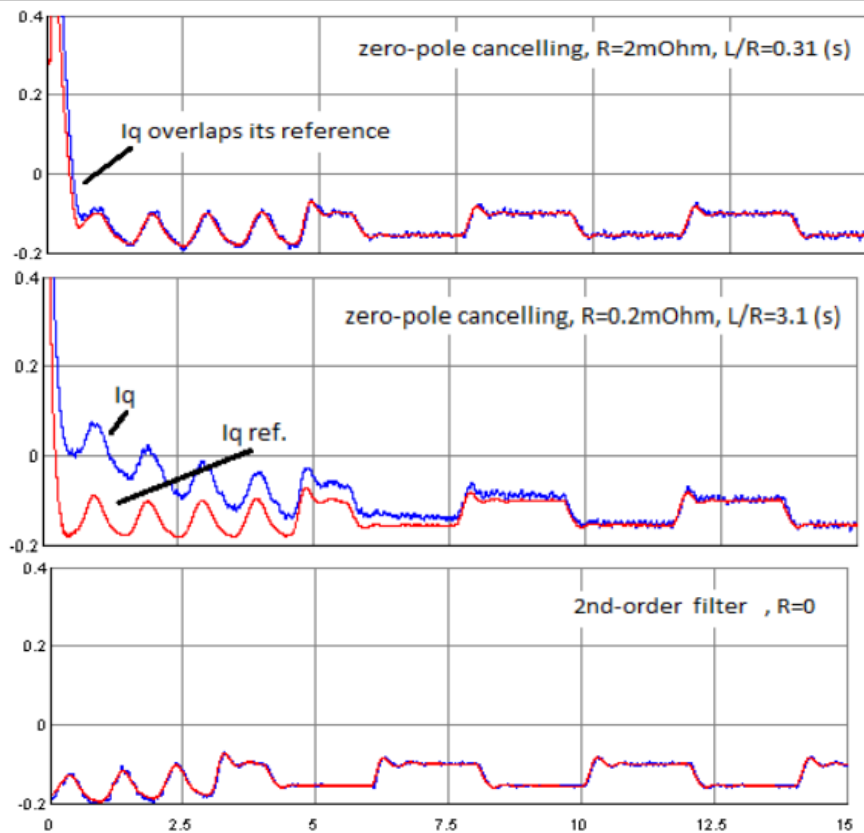
شکل ۹ تا ۱۱ صحت سنجی مدل شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی RTDS با نتایج شبیه‌سازی PSCAD و آزمایشات سیستم معیار STATCOM مقایسه می‌شوند. تمام پارامترهای کنترلی و سیستم در [66] مشخص شده‌اند. به طور خاص به ظرفیت‌های STATCOM در تنظیم ولتاژ DC و برای کنترل محور q علاقه‌مند هستیم. شکل ۹ و ۱۰ پاسخ‌های ولتاژ DC و جریان محور d برای تغییر مرحله‌ای مرجع ولتاژ DC مشخص شده توسط سیستم معیار و مدل توسعه یافته را نشان می‌دهند. شکل ۱۱ و ۱۲ پاسخ‌های جریان‌های محور q برای تغییر مرحله‌ای مرجع جریان محور q مشخص شده توسط سیستم معیار و مدل توسعه یافته را نشان می‌دهند. نتایج توافق مناسبی بین مدل ارائه شده و سیستم معیار نشان می‌دهند.

### نتایج شبیه‌سازی

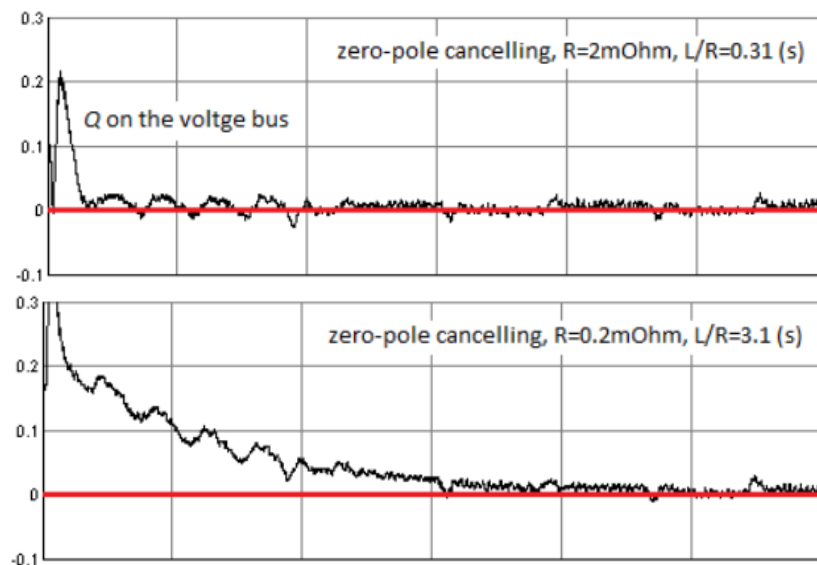
شرایطی شبیه‌سازی در ادامه مشخص می‌شوند. القاگری رابط STATCOM برابر 0.62mH است. ثابت زمانی کنترل حلقه داخلی برابر 4.0MVA است و ثابت زمانی ماشین بار متغیر برآورد 0.4MVA است. جزئیات پارامترهای مدل در پیوست A آورده شده است. کنترل STATCOM در بخش ۱-۱ بررسی شده است.

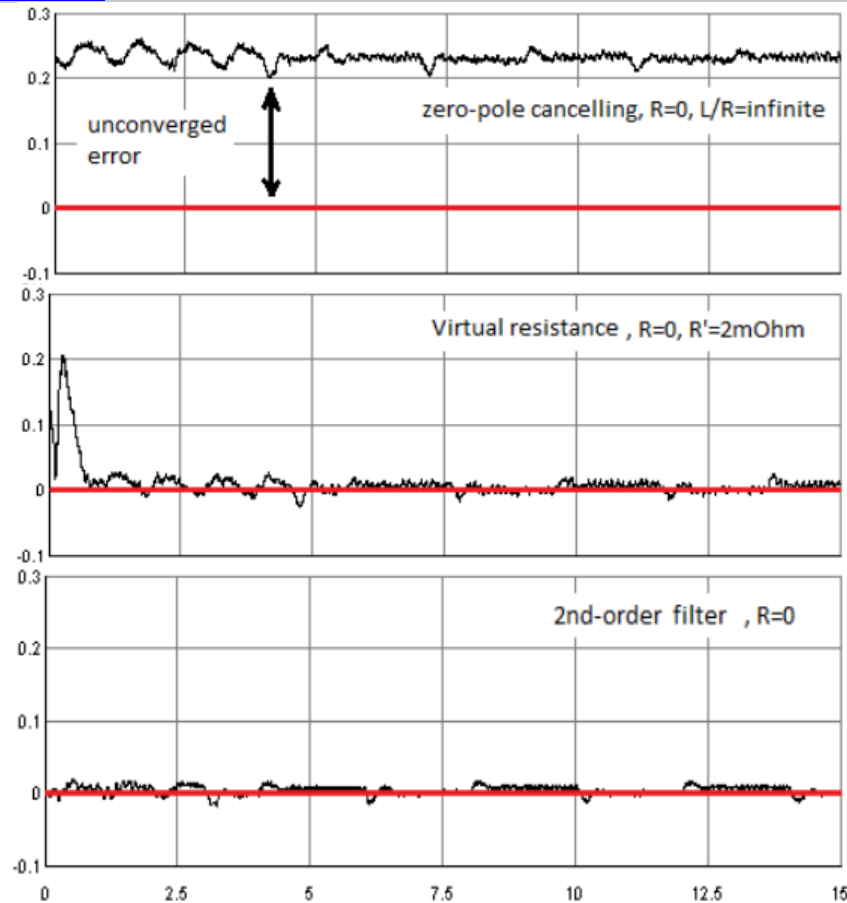
مراجع و مقادیر واقعی نیروهای واکنشی و جریان STATCOM تحت شرایط مختلف در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. خطای مسیریابی به کندی به سمت صفر میل می‌کند، زمانی که ثابت زمانی  $L/R$  برتری داشته باشد. این فرایند پایدار با کاهش R طولانی‌تر می‌شود. زمانی که R برابر صفر باشد، خط مسیریابی دیگر هم‌گرایی نخواهد داشت و به خطای حالت پایدار تحت شرایط روش لغو قطب صفر تبدیل می‌شود. در حالت مقایسه، در روش ارائه شده هنوز هم هم‌گرایی خطای مسیریابی را با سرعت ثابت زمانی T حتی در صورت R=0 ایجاد خواهند کرد.

در نتیجه، نتایج شبیه‌سازی اثرات ابعاد پنهان در کنترل VSC را نشان می‌دهند. با کاهش مقاومت رابط هم‌گرایی خطای جریان آرام‌تر می‌شود و خروجی‌های کنترل شده نمی‌توانند هنگامی که مقاومتی وجود نداشته باشد مراجع را دنبال کنند. این نتایج با تحلیل‌های نظری هماهنگی دارند. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهند که در روش ارائه شده می‌توانند این مشکل را برطرف کنند.



شکل ۱۰ نمودار مراجع و مقادیر واقعی جریان محور  $q$  تحت پنج حالت مختلف (KA بر حسب زمان)





شکل ۱۱ مراجع و مقادیر واقعی نیروی واکنشی Q تحت پنج حالت مختلف

### نتیجه گیری

این بخش چگونگی مشخص کردن پارامترهای PI در کنترل جداسدگی dq VSC به ویژه هنگام نبودن مقاومت رابط مبدل کافی را مطالعه کرده است. هنگامی که مقاومت رابط  $R$  و القاگری  $L$  مشخص باشند، لغو قطب صفر روش شناخته شده ای برای محاسبه پارامترهای PI خواهد بود. ریسک های مربوط به قطب لغو شده، در این روش هرگز به صورت کامل پیش از آن بررسی نشده بودند. در این پژوهش، با استفاده از مدل فضای حالت، قابلیت کنترل، قابلیت مشاهده و پایداری قطب لغو شده مطالعه می شوند. نتایج نشان می دهد که با استفاده از روش لغو قطب صفر، ابعاد پنهان مربوط به قطب لغو شده بر عملکرد کنترل چیره خواهند شد و همگرایی را کند می کنند. در روش برای حل کردن این مشکل ارائه شده اند که روش مقاومت مجازی و فیلتر مرتبه دوم نامیده می شوند. مورد اول قطب لغو شده در صفحه  $S$  را باز گزاری می کند و مورد دوم ابعاد پنهان را از بین می برد. هر دو روش ارائه شده می توانند عملکرد کنترل مناسبی را صرف نظر از مقدار  $R$  به دست آورند.

فهرست مراجع

1. H. M. Hasanien, "A Set-Membership Affine Projection Algorithm-Based Adaptive-Controlled SMES Units for Wind Farms Output Power Smoothing," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1226-1233, Oct. 2014
2. A. Barnes, J. Balda, A. Escobar-Mejía, "A semi-Markov model for control of energy storage in utility grids and microgrids with PV generation," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 6, no. 2, pp. 546-556, 2015

3. A. Blavette, D. L. O'Sullivan, R. Alcorn, T. W. Lewis, M. G. Egan, "Impact of a Medium-Size Wave Farm on Grids of Different Strength Levels," IEEE Trans. on Power Systems, vol. ۲۹, no. ۲, pp. ۹۱۷-۹۲۳, March ۲۰۱۴
4. A. Ortega, F. Milano, "Generalized Model of VSC-based Energy Storage Systems for Transient Stability Analysis," IEEE Trans. on power systems, vol. ۳۱, no. ۵, pp. ۳۳۶۹-۳۳۸۰, ۲۰۱۶
5. B. Singh, R. Saha, A. Chandra, "Static synchronous compensators (STATCOM): a review," IET Power Electronics, vol. ۲, no. ۴, pp. ۲۹۷-۳۲۴, ۲۰۰۹
6. F. J. Lin, H. C. Chiang, J. K. Chang and Y. R. Chang, "Intelligent wind power smoothing control with BESS," IET Renewable Power Generation, vol. ۱۱, no. ۲, pp. ۳۹۸-۴۰۷, ۲۰۱۷
7. H. M. Yassin, H. H. Hanafy and M. M. Hallouda, "Design and implementation of PI controllers of direct drive PMSG wind turbine system tuned by Linearized biogeography-based optimization technique," IECON ۲۰۱۶ - ۴۲nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
8. K. Ang, G. Chong, Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," IEEE Trans. on control systems technology, vol. ۱۳, no. ۴, pp. ۵۵۹-۵۷۶, ۲۰۰۵
9. M. Eltawil, Z. Zhao, "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. ۱۴, no. ۱, pp. ۱۱۲-۱۲۹, ۲۰۱۰
10. M. I. Daoud, A. M. Massoud, A. S. Abdel-Khalik, A. Elserougi and S. Ahmed, "A Flywheel Energy Storage System for Fault Ride Through Support of Grid-Connected VSC HVDC-Based Offshore Wind Farms," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. ۳۱, no. ۳, pp. ۱۶۷۱-۱۶۸۰ May ۲۰۱۶
11. M. Sandgani, S. Sirouspour, "Coordinated Optimal Dispatch of Energy Storage in a Network of Grid-connected Microgrids," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. ۸, no. ۳, pp. ۱۱۶۶-۱۱۷۶, ۲۰۱۷
12. N. Chaudhuri, B. Chaudhuri, R. Majumder, Multi-terminal Direct-current Grids: Modeling, Analysis, and Control. John Wiley & Sons, ۲۰۱۴
13. N. Flourentzou, V. Agelidis, G. Demetriades, "VSC-based HVDC power transmission systems: An overview," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. ۲۴, no. ۳, pp. ۵۹۲-۶۰۲, ۲۰۰۹
14. N. M. Kangwa, C. Venugopal and I. E. Davidson, "A review of the performance of VSC-HVDC and MTDC systems," ۲۰۱۷ IEEE PES PowerAfrica, Accra, ۲۰۱۷, pp. ۲۶۷-۲۷۳
15. N. Nayak, S. Mishra, S. Choudhury, "Optimal design of VSC based HVDC using Particle Swarm Optimization technique," in Proc. Power, Control and Embedded Systems, ۲۰۱۲, pp. ۱-۵
16. P. Malysz, S. Sirouspour, A. Emadi, "An optimal energy storage control strategy for grid-connected microgrids," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. ۵, no. ۴, pp. ۱۷۸۵-۱۷۹۶, ۲۰۱۴
17. R. E. Precup, R. C. David, E. M. Petriu, M. B. Radac and S. Preitl, "Adaptive GSA-Based Optimal Tuning of PI Controlled Servo Systems With Reduced Process Parametric Sensitivity, Robust Stability and Controller Robustness," in IEEE Transactions on Cybernetics, vol. ۴۴, no. ۱۱, pp. ۱۹۹۷-۲۰۰۹, Nov. ۲۰۱۴
18. R. N. Tripathi and T. Hanamoto, "FRIT based optimized PI tuning for DC link voltage control of grid connected solar PV system," IECON ۲۰۱۵ - ۴۱st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, ۲۰۱۵, pp. ۰۰۱۵۶۷-۰۰۱۵۷۲

19. R. Pena, J. Clare, G. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. ۱۴۳, no. ۳, pp. ۲۳۱-۲۴۱, ۱۹۹۶
20. S. Chacko, C. N. Bhende, S. Jain and R. K. Nema, "PSO based online tuning of PI controller for estimation of rotor resistance of indirect vector controlled induction motor drive," ۱۳۶ ۲۰۱۶
21. S. R. Arya, R. Niwas, K. Kant Bhalla, B. Singh, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Power Quality Improvement in Isolated Distributed Power Generating System Using DSTATCOM," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. ۵۱, no. ۶, pp. ۴۷۶۶-۴۷۷۴, Nov.-Dec. ۲۰۱۵
22. T. Kumbasar and H. Hagrass, "A Self-Tuning zSlices-Based General Type-۲ Fuzzy PI Controller," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. ۲۳, no. ۴, pp. ۹۹۱-۱۰۱۳, Aug. ۲۰۱۵
23. T. Ma, M. H. Cintuglu and O. A. Mohammed, "Control of a Hybrid AC/DC Microgrid Involving Energy Storage and Pulsed Loads," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. ۵۳ no. ۱, pp. ۵۶۷-۵۷۵, Jan.-Feb. ۲۰۱۷
24. W. K. Ho, C. C. Hang and J. H. Zhou, "Performance and gain and phase margins of well-known PI tuning formulas," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. ۳, no. ۲, pp. ۲۴۵-۲۴۸, Jun ۱۹۹۵
25. Z. Gaing, "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system," IEEE Trans. on energy conversion, vol. ۱۹, no. ۲, pp. ۳۸۳-۳۹۱, ۲۰۰۴